

УДК 629.423.33 : 621.336.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.151751

Порівняльні випробування контактних елементів струмоприймачів з метою комплексної оцінки їх експлуатаційної якості

М. О. Баб'як, В. Л. Горобець, В. Г. Сиченко, Є. В. Горобець

Проведено дослідження взаємодії контактних елементів пантографів електричного транспорту, що експлуатується на ділянках постійного та змінного струму залізниць. На відміну від відомих методик стендових випробувань, досліджено механізм струмознімання і зносостійкості на новій випробувальній установці у мінімально вузькій зоні ковзного контакту, що імітує явище "пропилю" пантографа. Дана установка може бути використана як в заводських умовах при виготовленні нових контактних елементів, так і в лабораторних при дослідженнях зносостійкості.

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що інтенсивність зносу контактних елементів струмоприймачів залежить від струмового навантаження зони контакту, величини контактного натиску, площі контактуючої поверхні та швидкості руху. Практично доведено можливість збереження надійного контактного з'єднання у ковзному контакті в екстремальних режимах експлуатації при використанні надійного контактного матеріалу накладок струмоприймача.

Запропоновано використання композиції порошків БрЗГ на основі бронзи, заліза і графіту для виготовлення контактних елементів струмоприймачів, які можуть забезпечувати надійний контакт при взаємодії з контактним дротом. Використання нових і якісних контактних матеріалів впливає на трибологію та стабільність взаємодії контактних пластин та контактного дроту.

Завдяки проведеним дослідженням знайдено можливість виготовлення надійного контактного елемента БрЗГ, який збільшить довговічність взаємодії контактної пари "струмоприймач електричного транспорту – контактна мережа".

Практична цінність досліджень доведена ефективністю використання нового контактного матеріалу БрЗГ на мережі залізничного електричного транспорту, на тролейбусах і трамваях.

Таким чином, є підстави стверджувати про можливість продовження терміну експлуатації контактної пари "накладка струмоприймача електричного транспорту – контактна мережа" шляхом використання нового контактного матеріалу БрЗГ.

Ключові слова: накладки пантографа, вставки струмоприймача, контактний матеріал, знос контактів, контактна пластина, електричний транспорт

1. Вступ

Основною проблемою електричного транспорту залізниць постійного чи змінного струму є знос контактних елементів струмоприймачів. Експлуатаційна надійність контактної пари "контактний елемент пантографа – контактний провід" залежить від якості матеріалу, з якого виготовлені обидва елементи. На неї впливають характеру зносу, величини спрацювання, механічного пошкодження, електромеханічні процеси в зоні контакту, кліматичні умови, режим ведення поїзда, та триботехнічні властивості контактуючих матеріалів.

Безперечно, головну частину вимог має задовольняти контактний провід, який у більшості випадків виготовляється з міді [1]. Мідні фасонні контактні дроти вже не задовольняють сучасним суворим вимогам експлуатації важковагових вантажних поїздів, або швидкісних пасажирських поїздів.

Контактні матеріали струмоприймачів електрорухомого складу повинні забезпечувати якісне передавання електричного струму як до силових електричних кіл, так і безперебійно живити допоміжне обладнання, робота якого забезпечує функціонування всього рухомого складу і безпеку руху.

На даний час не існує контактного матеріалу, який би повністю задовольнив вимоги Пам'ятки ОСЗ Р674/1 [2] щодо мінімального зносу контактного дроту і самих контактних пластин та малого питомого опору ковзної контактної пари.

Актуальною проблемою є розробка нового контактного матеріалу, який би зміг задовольнити потреби як залізничного магістрального і промислового для усіх швидкостей руху, так і міського електричного транспорту.

У роботі досліджується можливість використання накладок пантографів з нового контактного матеріалу БрЗГ на основі бронзи, заліза і графіту за результатами порівняльних стендових випробувань з накладками різних виробників. Оцінка струмознімання і зносу ковзного контакту проводиться у мінімально вузькій зоні контактування при різних струмах і різних швидкостях руху.

2. Аналіз літературних даних за даною проблемою

Для електрорухомого складу змінного струму, відповідно до Правил технічного обслуговування та ремонту, у якості контактних елементів струмоприймачів використовують вугільні вставки [3–5]. У деяких локомотивних та моторвагонних депо використовували контактні вставки на основі міді, або графіту, які мають більший ресурс, ніж традиційні.

Для підвищення надійності контакту "вугільна вставка струмоприймача електрорухомого складу – контактна підвіска", у [6] застосовується лазерне зміцнення контактного дроту та самих вугільних вставок. У роботі недостатньо висвітлено як буде вести себе такий контактний провід на ділянках з мідними накладками. Також не досліджено як контактний провід і вставки будуть працювати на вантажних та пасажирських поїздах на різних струмах.

При дослідженні якості виготовлення струмознімальних вставок різних виробників на натурних зразках [7] звужено діапазон твердості для вугільних вставок і розроблено методику сортування вугільних вставок за твердістю,

встановлено невідповідність струмознімальних вставок існуючим нормативним вимогам. У вставок встановлено різку структурну неоднорідність матеріалу та коливання щільності вставки по довжині. Встановлено залежність між твердістю вставок та питомим електричним опором. Однак, не відомо, чи хоча б в одному локомотивному депо виконується перевірка твердості, і монтаж відповідно до запропонованої методики усіх вугільних вставок, оскільки при щоденному використанні сотень вставок це фізично не реально.

Одним з недоліків графітових струмознімальних елементів є відсутність фізико-хімічної взаємодії складових компонентів матеріалу, яка є причиною високого питомого електроопору та низької зносостійкості [8]. Стендові дослідження ковзних контактів із прес-порошку на основі природного графіту та штучного графіту (зразок 1) і на основі природного графіту та піролітичного вуглецю (зразок 2) показали, що середній питомий знос запропонованих вставок менший в 1,3...1,9 рази ніж у серійних графітових. При наявності води в зоні контакту, контактний опір дослідних вставок нижче в 1,1...1,4 рази в порівнянні з серійними. Описані стендові дослідження виконуються лише для вставок тролейбуса, які мають свою специфіку роботи.

Для електрорухомого складу постійного струму [9], передбачено в якості накладки на полозах струмоприймача використання мідної шини 6×30 мм [10], яка інтенсивно зношує контактний дріт і зношується сама. Дозволяється [11] використання міднографітових вставок, або металокерамічних накладок, наприклад, на залізо-мідній основі, просочені свинцево-оловянистим сплавом ВЖЗп, які потребують постійного змащення графітовим мастилом СГС, ефективність якого недостатня [12]. Враховуючи експлуатаційні недоліки, вимоги екологічної безпеки, значний знос контактної дроту та інші фактори, ці пластини заборонені до використання.

Дослідження [13] показують, що при одночасній експлуатації ковзних контактних елементів з різних матеріалів спостерігається руйнування старих і виникнення нових вторинних структур, що призводить до інтенсивного зношування, оскільки вони постійно перебувають в процесі припрацювання. Нормативними документами України та Євросоюзу експлуатація на одній ділянці різних контактних матеріалів заборонена.

Контактні вставки повинні задовольняти умові мінімального зносу контактної дроту при забезпеченні надійного струмознімання, а також мати максимально можливий міжремонтний пробіг. Тобто, матеріал вставки повинен мати високі фізико-механічні та антифрикційні характеристики, низький питомий і перехідний електроопір, високу електроерозійну стійкість, що інколи є несумісним, або важко реалізованим [14]. Особливо складно це поєднати для умов експлуатації міського електричного транспорту.

Недоліком словацьких мідно-графітових контактних пластин МГ-487 є низький коефіцієнт тертя та недостатня дугостійкість при струмоприйомі. Схоплення контактуючих поверхонь призводить до підвищеного зносу контактної дроту і пропилів самих контактних пластин.

Приблизно ці ж недоліки спостерігалися й у суцільній довгій мідній контактній пластині з вставками графіту НМГ-1200, які вироблялися НТЦ

«Реактивелектрон» (м. Донецьк, Україна). Їхні не наскрізні отвори заповнювалися графітом на товщину робочого шару, який відігравав роль звичайного графітового мастила. Досягти підвищеної зносостійкості та зменшити знос контактного дроту не вдалося.

На даний час на електровозах постійного струму експлуатуються пластини контактні на мідній основі ПКД-4, ТОВ «Інтер–Контакт–Пріор» (м. Київ, Україна), які мають більший ресурс експлуатації, ніж НМГ-1200. Проте, контактні пластини ПКД-4 також мають схильність до електричного схоплення, натягування на себе міді з контактного дроту, підгоряння та оплавлення. Однією з переваг над контактними пластинами інших виробників є наявність вмонтованих латунних гвинтів. Іноді це стає недоліком цієї пластини, коли гвинт виламується з пластини, або ж ламається при закручуванні шурупом. Ще однією з переваг, про які заявляє виробник, є можливість експлуатації цих контактних накладок без додаткового нанесення мастила в зону контакту. Але, як з'ясувалося під час серійної експлуатації, на окремих ділянках обслуговування виникає потреба в застосуванні змащування зони контакту.

Вставка цього ж виробника з назвою ПКД-4-2-Т проходила випробування на трамвайних вагонах [15]. В експерименті досліджувалися вставки на основі не зміцненої міді, на основі дисперсно-зміцненої міді (ДЗМ) отриманої за технологією пресування з наступним спіканням, та на основі ДЗМ отриманої гарячим штампуванням. Вставки пантографів ПКД-4-2-Т мали кращі експлуатаційні характеристики та більший ресурс ніж вставки на основі алюмінію АД31Т.

Струмоз'ємні вставки з фуллерено-вуглецевого матеріалу «Романіт-УВЛШ» [16] досліджуються на ділянках постійного і змінного струму. Вставка має сталеву підкладку з мало вуглецевої сталі товщиною 2 мм і робочий шар товщиною 7 мм. Експлуатація не повинна потребувати додаткового мастила, оскільки готові накладки повинні бути піддані вакуумному просочуванню мастилом згідно з технологічним процесом підприємства – виробника.

Якість струмознімання, яка залежить від надійності контакту між струмоприймачем та контактним дротом досліджувалася в [17]. Результати неякісної взаємодії пропонується діагностувати по перегріву накладки пантографа та дії електричної дуги. Проте, це вже наслідок експлуатації, а не попередження виходу з ладу контактного елемента.

Процеси зносу контактного матеріалу при високій швидкості ковзання під дією електричного струму та без нього досліджено у [18]. Підтверджено вплив на трибологію випробуваного матеріалу дії струму та швидкості. Однак струми при досліджах були відносно малими, щоб порівняти роботу контактної пари в реальних умовах.

Залежність стійкості електричної дуги в контакті між контактною пластиною та контактним дротом та вплив дуги на механізм зношування контактної пари описано в [19]. Підтверджено, що підвищення нормальної сили притискання може придушити дуговий розряд і зменшити знос контактної пластини. Однак для малих швидкостей руху з великими струмами цих даних

не наведено, що не дає повноти інформації для оцінки роботи контактних елементів на вантажних електровозах.

У [20] запропоновано прогнозування зносу контактної пластини при лабораторних випробуваннях, що дозволяє проводити порівняння між різними матеріалами та встановлювати залежність від основних параметрів, таких як швидкість ковзання, контактна сила та величина струму. Розглянуто залежність опору електричного контакту від контактної сили між кожною контактною смугою пантографа та контактним дротом. Для регулювання процесу зносу рекомендується змінювати натяг контактного дроту. Про використання різних контактних матеріалів інформації немає.

Вплив електричного струму, сили натиску та швидкості руху на фрикційні та зносостійкі властивості чистої вугільної смуги досліджується в [21] на випробувальному стенді. Розглянуто вплив ерозії дуги, абразивного зносу та зносостійкості на знос вугільної вставки. Показано, що знос залежить від наявності струму в зоні контакту. Однак для інших матеріалів таких досліджень не проведено, або про них не подано інформації.

У [22] досліджується тільки вугільна вставка і залежності коефіцієнту тертя та зносу з електричним струмом. Аналогічні дослідження проводилися і раніше в [23] при високошвидкісному терті. Основними складовими зносу встановлені абразивний знос і дугова ерозія при електричному процесі фрикційного ковзання. Досліджень інших матеріалів, окрім вугільної вставки, не висвітлено.

Як видно з літературних джерел [6–8, 15–23], напрямок по вирішенню проблеми зносу контактної пари "накладка струмоприймача – контактний провід" у кожного дослідника свій. Одні намагаються удосконалити вугільну вставку, а інші це питання вирішують за рахунок регулювання натягу контактного дроту. Спроби серійного виготовлення універсальної надійної контактної пластини для постійного і змінного струму усіх видів транспорту поки що не дали позитивного результату. Це невирішене питання дозволяє стверджувати про перспективність використання порошкових композиційних матеріалів і доцільність досліджень нового контактного матеріалу.

Для сильноточових ковзних контактів краще використовувати не штучний, а природний графіт, що одночасно виконує антифрикційні функції. У мідних і мідно-графітових контактних елементах необхідно використовувати якомога чистішу мідь, оскільки домішки знижують електропровідність.

При виготовленні і впровадженні в експлуатацію нового контактного елемента є доцільним проведення комплексного дослідження, починаючи від сировини, з якої виготовляється контактний елемент, і закінчуючи аналізом контактної поверхні після зносу.

Основними для виробника і експлуатаційника є висновки комісій по проведенню лабораторних та експлуатаційних випробувань.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є комплексна оцінка експлуатаційної якості контактних елементів струмоприймачів електричного транспорту.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- провести дослідження фізичних, триботехнічних та експлуатаційних властивостей накладок струмоприймачів з відомих контактних матеріалів та з нового перспективного матеріалу;
- провести комплексні порівняльні лабораторні та стендові випробування накладок з нового матеріалу БрЗГ з відомими контактними матеріалами та підтвердити отримані результати в умовах реальної експлуатації;
- чисельно оцінити технологічні та експлуатаційні показники параметричної надійності накладок із різних матеріалів за критерієм їх зносу;
- при позитивних результатах комплексних випробувань, впровадити результати розробки модельного ряду накладок БрЗГ у локомотивних, моторвагонних, тролейбусних та трамвайних депо.

4. Матеріали та методи дослідження впливу властивостей контактних матеріалів на зносостійкість контактних елементів струмоприймачів електричного транспорту

4.1. Матеріали та обладнання, що використовувались в дослідженні

Для повноти даних досліджень проведено аналіз умов експлуатації і порівняння основних характеристик контактних елементів струмоприймачів електричного транспорту, що подаються виробниками. Для порівняльних досліджень вибрані найбільш поширені на даний час контактні елементи:

- вугільні контактні вставки пантографів типу "А";
- вугільні контактні вставки пантографів типу "Б";
- вставки тролейбусні типу "Б";
- вуглецеві вставки полозів трамваїв;
- мідь пантографна для струмоприймачів (шина мідна 6х80);
- металокерамічні пластини ВЖЗп;
- мідні контактні пластини з вставками графіту НМГ-1200;
- мідно-графітові контактні пластини МГ-487;
- контактні пластини на мідній основі ПКД-4-2;
- струмоз'ємні вставки з фуллерено-вуглецевого матеріалу «Романіт-УВЛШ»;
- контактні пластини БрЗГ.

Основні вимоги до контрольованих параметрів струмоприймачів зведені у Правилах ремонту відповідного типу електрорухомого складу. Вони регламентовані Технічними вимогами до струмоприймачів електрорухомого складу Р668 [24] та ГОСТ 32204-2013 [25]. Основні вимоги до контактних елементів струмоприймачів та проведення їх випробувань зведені в ГОСТ 32680-2014 [26] та нормативами Євросоюзу EN 50318:2002 [27].

Матеріали, з яких виробляються електричні контакти, повинні при високій стабільності перехідного опору в замкнутому стані контактів мати хорошу теплопровідність та електропровідність. Контактні поверхні матеріалу повинні мати високий опір окисленню та електричній ерозії в стані замикання та розмикання контактів, незначну схильність до зварювання з зворотними контактами. У [28] пропонується ці жорсткі й суперечливі вимоги частково

задовольнити шляхом створення композиційних матеріалів на основі графіту з додаванням у різній пропорції міді, або інших наповнювачів.

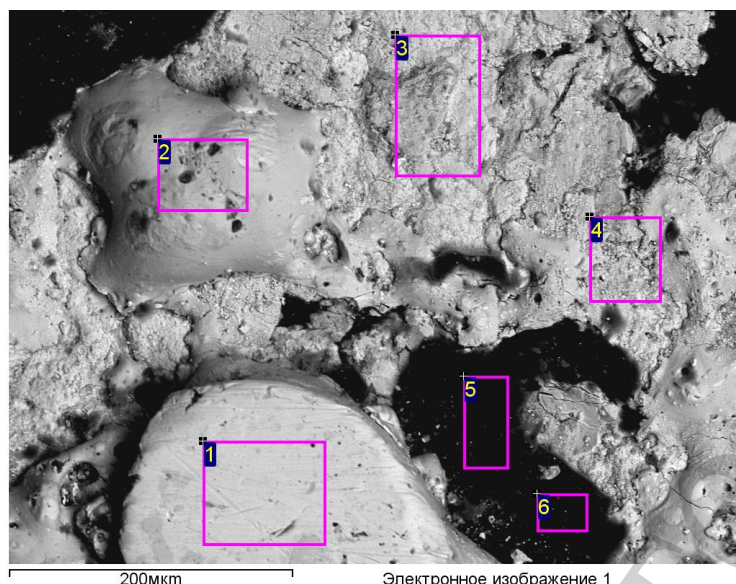
Основою композиції для виготовлення перспективного антифрикційного сильнострумового ковзного контактного елемента струмознімного елемента струмоприймача електрорухомого складу було обрано бронзу, залізний порошок та природний графіт, таким чином матеріал названо БрЗГ [29].

Під час розробки і досліджень контактного елемента БрЗГ, у композиції дослідним шляхом встановлено оптимальний вміст природного графіту, при якому забезпечуються антифрикційні властивості в зоні контакту, зберігаючи при цьому фізичні і механічні властивості контактного елемента. При збільшенні струму навантаження при малих швидкостях за рахунок нагрівання від сили струму, або при великих швидкостях і малих струмах за рахунок сил тертя, на поверхні контактного елемента БрЗГ утворюється графітизована політура. Завдяки цьому одночасно "змочується" зона контакту і змащується контактна пара "накладка струмоприймача – контактний дріт" [30].

Пропонована композиція технічно дозволила створити матеріал, який без використання зовнішнього мастила забезпечує зменшення зносу контактного проводу і струмоз'ємного елемента за рахунок зменшення коефіцієнту тертя при забезпеченні необхідних механічних і електрофізичних властивостей.

Електронно-мікроскопічні та мікрорентгеноспектральні дослідження проводили за допомогою растрового електронного мікроскопу JSM-64901LV (Японія) з енергодисперсійним спектрометром INCA Penta FETx3 (OXFORD Instruments). Програма досліджень передбачає проведення комплексного макроструктурного, мікрорентгеноспектрального та мікроструктурного аналізу для зразків з кожної серії контактних накладок до та після експлуатаційних випробувань. Досліджується характеристика і структура усіх накладок; ідентифікація фазових і структурних складових в дослідних зразках та об'ємний відсоток складових і структурна однорідність матеріалів.

З метою виявлення найкращого зразка матеріалу накладок для експлуатації на постійному електричному струмі були використані контактні пластини різних виробників. Приклад дослідження розподілу хімічних елементів в структурі композитного матеріалу накладки пантографу ПКД-4 виробництва ТОВ «Інтер-Контакт-Пріор» (м. Київ, Україна), який пройшов випробування на Львівській залізниці, наведено на рис. 1 [32].



спектр	C	O	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Mo	Pb
1	4,93	2,02	0,15	0,04	0	0	0,13	1,04	91,22	0	0,57
2	9,64	12,66	0,03	0	0,43	0,16	0	9,18	66,57	0,34	1,01
3	7,8	10,17	0,04	0,03	0,07	0,08	0	17,24	63,47	0	1,24
4	11,5	9,94	0,06	0,06	0,2	0,14	0,08	13,48	61,93	0,26	2,2
5	91,24	4,48	0,04	0,39	0,19	0,04	0	0,76	2,96	0	0,62
6	93,14	4,09	0,01	0,04	0,25	0	0	0,34	2,35	0	0,16

Рис. 1. Мікроструктура та хімічний склад зразку матеріалу вставки виробництва ТОВ «Інтер–Контакт–Пріор», м. Київ, Україна, який пройшов випробування на Львівській залізниці

Для фрактографічних досліджень використані зразки зломів вставок пантографів, що утворилися під час експлуатаційних випробувань за критерієм виявлення первісної тріщини та структурних складових, що є її ініціаторами.

Для якісного аналізу на вміст хімічних елементів в зразках порошків, а також вимірювання масової частки елементів, що містяться в зразках контактних елементів струмоприймачів, використовується енергодисперсійний рентгенофлуоресцентний аналізатор "EXPERT 3L". Зразки контактних пластин вибираються за умовами перевірки на відповідність ТУ виробника, чи на вміст реальних складових у даному зразку. Приклад візуалізації спектру досліджень на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному аналізаторі "EXPERT 3L" для контактних пластин БрЗГ наведено на рис. 2.



Рис. 2. Результати енергодисперсійного аналізу контактної пластини БрЗГ

Для проведення електричних вимірювань опору контактних накладок струмоприймачів використовується цифровий мікроомметр Megger DLRO 10X, який дозволяє у повністю автоматичному режимі вибрати найбільш підходящий тестовий струм до 10 А d.c. для вимірювання опору від 0,1 мкОм до 2000 Ом, на одному з семи діапазонів. Результати отриманих вимірювань використовуються при розрахунках і порівняльній оцінці технологічної та експлуатаційної стабільностей, а також показників параметричної надійності накладок із різних матеріалів. Ці величини дозволяють отримати аналітичні вирази контактного опору ковзних контактних з'єднань силових кіл електрорухомого складу з врахуванням мікротвердості і питомих опорів матеріалів контактних елементів струмоприймачів і плівки на них.

4. 2. Методика дослідження процесу зносу і струмознімання ковзних контактних елементів струмоприймачів електричного транспорту

Оцінку зносостійкості контактних елементів проводили відповідно до розробленої методики порівняльної оцінки якості контактних пластин (рис. 3).

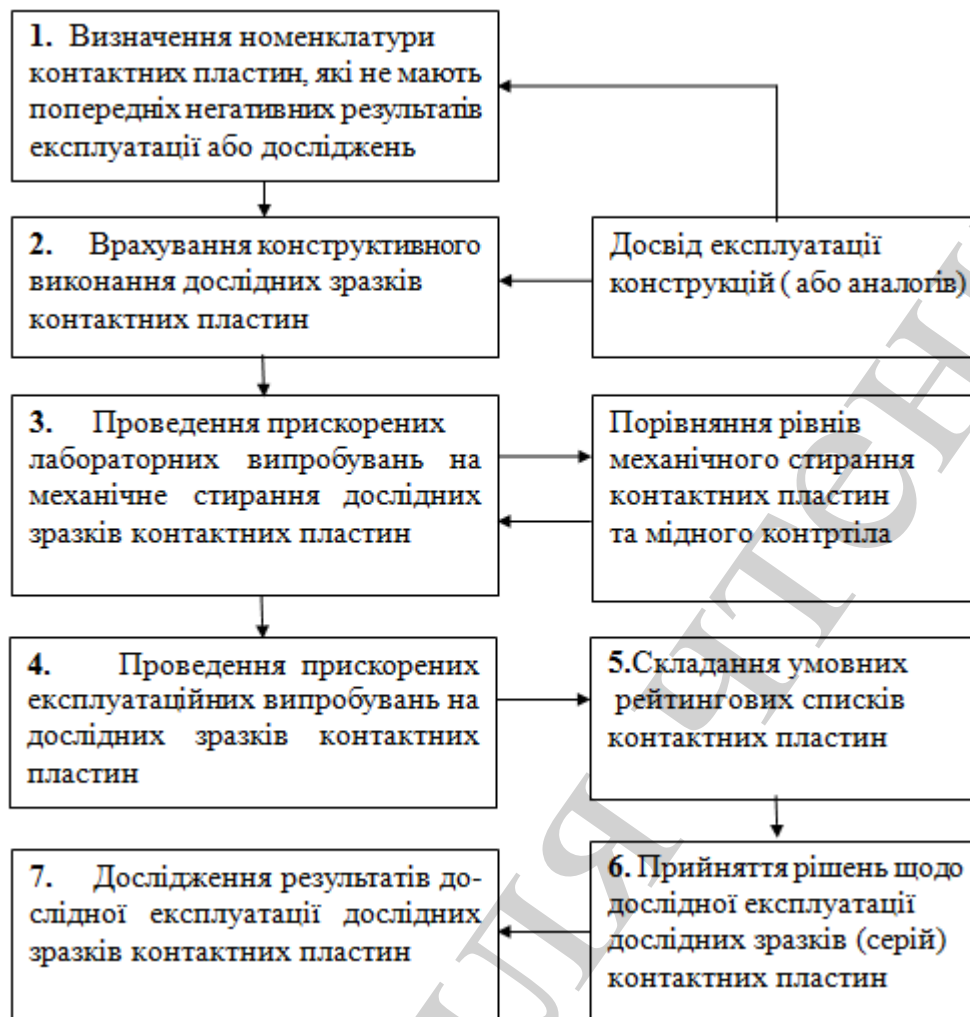


Рис. 3. Методика порівняльної оцінки якості контактних пластин

На відміну від відомих оцінок показників параметричної надійності роботи сильнострумівих ковзних контактів, при комплексних дослідженнях контактних елементів струмоприймачів електрорухомого складу за критеріями зносу і контактного опору, в розрахунки введено кореляційний зв'язок між контактним опором і температурою ковзних контактів. Показники експлуатаційної надійності уточнюються з врахуванням впливу контактного натиску на контактний провід, чим враховуються особливості конструкції вставок чи накладок струмоприймача і умови роботи.

Особливістю зносу контактних проводів є утворення площини контакту з максимально допустимими значеннями для кожної марки контактної дроти при різних швидкостях руху на ділянці. При цьому на контактуючій поверхні самого дроти утворюється площа, яка при сухому терті буде інтенсивно зношувати накладки струмоприймачів і сам контактний дріт. В експлуатації не допускають зносу контактної дроти при встановленому максимальному значенні. Наприклад, для найбільш поширеного мідного фасонного МФ-100 з площею перетину $S=100 \text{ мм}^2$ ця величина становить 35 мм^2 , що відповідає висоті $h=7,77...7,64 \text{ мм}$ [33]. Тому при проектуванні установки для

випробовування експлуатаційних властивостей та дослідження процесу зносу і струмознімання ковзних електричних контактів використано мідну шину $10 \times 2,5$ мм, а не контактний провід.

На випробуваннях імітується максимальний знос контактного проводу для максимальної площі контакту ковзної контактної пари "струмоприймач електричного транспорту – контактна мережа". Цим створюються в 4 рази жорсткіші умови для випробувань контактних пластин, ніж регламентує ГОСТ 32680-2014 [32]. Враховуючи, що контактна мережа не є ідеально рівною в плані, імітується незначне бокове відхилення контактної шини $\pm 0,5$ мм в точках дотику з пластинами, які розміщені діаметрально протилежно і притискаються з регульованим зусиллям 40 ± 8 Н [32]. Усі "нерівності контактної мережі" відслідковують дві підпружинені "плаваючі" каретки, в яких і кріпляться випробувальні контактні елементи струмоприймача.

Особливістю є розташування контактних елементів у самій каретці – верхня поперек контактного диска установки, а нижня повздовж, що дозволяє випробовувати контактні елементи будь якого виду електричного транспорту без додаткового переналаштування установки (рис. 4).

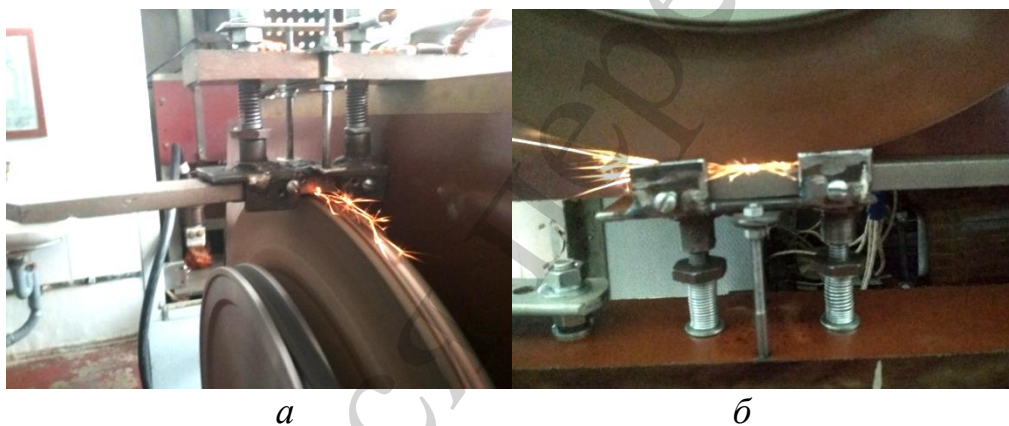


Рис. 4. Проходження "розриву" контактного дроту контактною пластиною під струмовим навантаженням в підпружинених "плаваючих" каретках:
а – верхній поперечний контакт; б – нижній повздовжній контакт

Крім того, контактне кільце, що імітує контактний провід, не є суцільним, а навмисно має стик. При проходженні стику в контактній пластині відбувається перехідний процес, що імітує короткочасний відрив полоза струмоприймача від контактного дроту. Аналогом цього є проходження контактної щітки двигуна по колекторній пластині. Це дає додаткову можливість проводити випробування будь якої пари ковзного контакту.

Враховуючи, що випробування повинні проводитися для різних режимів роботи – від малих до максимально допустимих швидкостей руху при регульованій силі струму, на установці передбачено перемикачі ступеневого переключення позицій. Контрольована швидкість регулюється в діапазоні 5...150 км/год., а струм регулюється в межах 0...500 А.

До і після випробувань контактні пластини зважуються, вимірюється товщина пластини в зоні контакту з контактним дротом за допомогою мікрометра ГОСТ 6507-90, а у десяти контрольних точках вимірюється висота контактної шини. Впродовж усього часу випробувань контролюється температура контактної пари ковзного контакту "накладка струмоприймача електрорухомого складу – контактний дріт" за допомогою термоелектричного цифрового термометра ТТ-Ц016-01.

5. Результати випробувань контактних пластин

Для підтвердження можливості використання контактного матеріалу БрЗГ в якості накладок струмоприймачів швидкісного та промислового електричного транспорту було проведено дослідження при різних швидкостях та струмах. Результати стендових випробувань контактних накладок (вставок) БрЗГ струмоприймачів електричного транспорту при різних швидкостях та струмах зведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати стендових випробувань контактних накладок (вставок) БрЗГ струмоприймачів електричного транспорту при різних швидкостях та струмах

№	Тип і матеріал накладки (вставки)	Положення на стенді відносно обертового диску	Кількість проходів накладки (обертів диску)	Пробіг накладки (вставки) км	Знос накладки (вставки) мм Питомий знос мм/км	Стан поверхні накладки (вставки)	Знос мідної шини, мм	Стан поверхні мідної шини
1	БрЗГ "+"	Зверху, поперек	10000 об $I=100$ А	14,287	0,10 0,007	гладка, світла політура, без подряпин	0,05 0,05 0,05 0,05	гладка, політура, без подряпин, без задирів
2	БрЗГ "-"	Знизу, вздовж	$V=110$ км/год	14,287	0,12 0,008	гладка, світла політура, без подряпин	0,05 0,05 0,05 0,05	$T_{\text{макс}}=84$ °C
1	БрЗГ "+"	Зверху, поперек	10000 об $I=350$ А	14,287	0,18 0,013	гладка, світла політура, без подряпин	0,06 0,05 0,06 0,05	гладка, політура, без подряпин, без задирів
2	БрЗГ "-"	Знизу, вздовж	$V=75$ км/год	14,287	0,20 0,014	гладка, світла політура, без подряпин	0,05 0,05 0,06 0,06	$T_{\text{макс}}=115$ °C

1	БрЗГ "+"	Зверху, поперек	10000 об $I=500$ А	14,287	0,25 0,017	гладка, темна політура, без подряпин	0,09 0,08 0,08 0,06 0,06	гладка, політура, без подряпин, без задирів $T_{\max}=158^{\circ}$ С
2	БрЗГ "–"	Знизу, вздовж	$V=60$ км/год	14,287	0,32 0,22	гладка, темна політура, без подряпин	0,06 0,07 0,06 0,08 0,09	

Примітка: "+" та "–" – полярність підведення струму до контактних пластин на випробувальній установці

Після випробувань було оцінено стан контактної поверхні контактних пластин БрЗГ та інших контактних накладок і вставок, і контактну поверхню контр-тіла – мідної смуги. На поверхні мідної шини, що імітує контактний провід, спостерігається чітка графітізована політура після усіх режимів роботи контактних пластин БрЗГ (рис. 5).



Рис. 5. Результати стендових випробувань контактних пластин БрЗГ:
а – контактні пластини БрЗГ; б – політура на контактній шині

Тільки при силі струму 500 А та швидкості 10 км/год. спостерігалось нагрівання контактної пластини вище 160°C і підгоряння місця контактної шини під час проходження "розриву" контактною пластиною під струмовим навантаженням (рис 4.). Для усіх інших режимів досліджень перегріву контактної пластини і підгоряння місця розриву контактної шини не зафіксовано (табл. 1).

Стан контактних пластин БрЗГ задовільний, зона тертя немає механічних ушкоджень – сколів, задирів, зламів. на поверхні зони, що терлася, видно хорошу графітізацію, а після протирання контактних поверхонь бензином видно, що зона контакту чітка. Слідів злому, змін в структурі, габаритних розмірах не виявлено (рис. 5).

Після випробувань контактних пластин (вставок) інших виробників на поверхні мідної шини, що імітує контактний провід, графітізації немає. У деяких випадках навпаки – відбуваються задирання контактної пари. Після випробувань вугільних контактних вставок спостерігається перенесення

частинок графіту без подряпин без задирів, але в порівнянні з іншими металізованими зразками, відбувається швидкий знос вставки (табл. 2).

Таблиця 2

Результати стендових випробувань контактних накладок (вставок) струмоприймачів електричного транспорту різних виробників

№	Тип і матеріал накладки (вставки)	Положення на стенді відносно обертового диску	Кількість проходів накладки (вставки) (обертів диску)	Пробіг накладки (вставки) км	Знос накладки (вставки) мм, /Питомий знос мм/км	Стан поверхні накладки (вставки)	Знос мідної шини, мм	Стан поверхні мідної шини
1	Вставка вугільна тип Б	Зверху, поперек	117	0,167	2,5/14,97	шорстка, раковини, висипання графіту	0,01 0,01 0,01 0,01 0,01 0,01	гладка, є залишки графіту, без подряпин без задирів
2	Вставка вугільна тип Б	Знизу, вздовж		0,167	2,5/14,97	шорстка, раковини, висипання графіту	0,01 0,01 0,01 0,01	
3	БрЗГ	Зверху, поперек	500000	714,35	1,1/0,0015	гладка, політура, без подряпин	0,2 0,2 0,2 0,1 0,1 0,2	гладка, чітка політура, без подряпин, без задирів
4	БрЗГ	Знизу, вздовж		714,35	1,3/0,0018	гладка, політура, без подряпин	0,1 0,1 0,1 0,2	
5	ПКД-4-2	Зверху, поперек	602	0,86	0,05/0,058	шорстка, раковини, висипання мідної стружки	0,3 0,3 0,1 0,2 0,2	темна, подряпана є задири по довжині, утворення раковин
6	ПКД-4-2	Знизу, вздовж		0,86	0,07/0,08 1	шорстка, раковини, висипання мідної стружки	0,2 0,3 0,2 0,2 0,3	

Усі зразки з нового матеріалу БрЗГ успішно пройшли стендові випробування відповідно до Програми-методики випробувань, що підтверджено відповідними актами та протоколами. Про це зроблено висновок комісії:

"Взірці контактних пластин марки "БрЗГ" ТУ У 31.2-2237310075-001: 2017 "Пластина контактна БрЗГ для струмоприймачів електротранспорту. Технічні умови" відповідають вимогам ДСТУ ГОСТ 32204:2016 (ГОСТ 32204-2013, IDT) "Струмоприймачі залізничного електрорухомого складу. Загальні технічні умови." та вимогам ГОСТ 32680-2014 "Токоъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические условия." і придатні до експлуатації на електрорухомому складі."

6. Обговорення результатів порівняльних випробувань контактних елементів струмоприймачів

Отримані в роботі результати можна вважати достатньо коректними, оскільки вони обумовлені як комплексним характером застосованої для створення накладок технології, так і комплексним характером методики порівняльної оцінки якості виробів.

Перевагою пропонованих накладок перед використовуваними на даний час на залізниці є досконала комбінація інноваційних технологій, завдяки чому забезпечується всебічне задоволення частково суперечливим експлуатаційним вимогам до них.

При проведенні подібних досліджень слід врахувати суб'єктивний характер експертних оцінок, який втім мінімізований завдяки застосуванню інноваційного методу ієрархічного порівняння характеристик накладок.

До недоліків дослідження можна віднести відсутність тривалих експлуатаційних випробувань накладок і прийняття підприємствами нових накладок до масового використання, хоча в тому ж полягає його перевага. Розвитком дослідження може бути стандартизація розглянутих підходів з наступним їх включенням до чинної нормативної бази.

На відміну від аналогічних досліджень, у вихідних даних було закладено "найважчий" режим контактування накладки і контактного дроту для пантографної накладки – припилювання полоза в одній зоні контактування.

Процес стирання пластини на стенді також відрізняється від умов контактування вставки штангового струмоприймача тролейбуса, оскільки має лінійну зону контактування поперек, а на тролейбусах в кращому випадку – дві площини, а в гіршому випадку – повздовжня лінія.

На етапі планування подальшого розвитку дослідження навмисно закладаються "критичні" режими роботи накладок, що у деяких випадках значно перевищують вимоги ДСТУ 32680–2014. Тому передбачити поведінку контактної пластини того чи іншого контактного матеріалу не можливо. Але тим цікавіше стає наступний етап – дослідити контактну поверхню після взаємодії.

Результати комплексних стендових випробувань було систематизовано і впроваджено у дослідне виробництво та підконтрольну експлуатацію у локомотивне, моторвагонне та тролейбусне депо.

6. Висновки

1. На розробленій випробувальній установці проведені порівняльні випробування контактних пластин, що дають можливість оцінити взаємодію з контактним дротом у мінімально вузькій зоні, що імітує "пропил" накладки. З результатів досліджень величин зносу, триботехнічних та експлуатаційних властивостей накладок струмоприймачів з відомих контактних видно, що у мінімально критичній контактній зоні випробування тільки контактні пластини БрЗГ забезпечили збереження контактної поверхні мідної шини без подряпин, без задирів та самої контактної пластини. На обох поверхнях спостерігалася гладка, чітка політура.

2. За основними критеріями комплексних стендових і експлуатаційних випробувань – зносостійкістю та довговічністю – оцінено технологічні та експлуатаційні показники параметричної надійності накладок струмоприймачів із різних матеріалів за критерієм їх зносу. Кращими себе зарекомендували накладки струмоприймачів з контактного матеріалу БрЗГ на основі бронзи, заліза і графіту. З отриманих результатів видно, що у мінімально критичній контактній зоні випробування пройшли тільки контактні пластини БрЗГ. Перевищення по зносостійкості матеріалу БрЗГ у 37 разів в порівнянні з ПКД-4, та у 9356 разів у порівнянні з вугільною вставкою типу Б.

3. Підтвердженням даних лабораторних і стендових випробувань є успішне використання накладок БрЗГ в умовах реальної експлуатації. На залізничному транспорті пластини БрЗГ використані в локомотивному депо Львів-Захід на електровозах постійного струму ВЛ-10, ВЛ11м у вантажному та пасажирському русі, та електровозах змінного струму серії ВЛ80 в режимі штовхача. У моторвагонному депо Львів пластини БрЗГ стали на заміну вугільній вставці на електропоїздах серій ЕР-2 та ЕПЛ2т.

У тролейбусному депо № 1 м. Львова контактні вставки БрЗГ протягом всього 2018 року експлуатувалися на всіх струмоприймачах тролейбусів марок "Електрон Т19101", "Електрон Т19102", "Škoda 14Tr", зчленованих "Škoda 15Tr", ЛАЗ-52522, ЕлектроЛАЗ-183. Експлуатація здійснюється на різних маршрутах міста при різних навантаженнях за будь яких погодних умов. Експлуатація продовжується. На даний час дослідна експлуатація накладок БрЗГ розпочинається на полозах струмоприймачів трамвайних вагонів Tatra KT4, які будуть випробувані в умовах зими на складних трамвайних ділянках міста Львова.

4. Практично доведена можливість продовження терміну експлуатації контактної пари "накладка струмоприймача електричного транспорту – контактний дріт" шляхом використання нового контактного матеріалу БрЗГ. За основними критеріями, вибраними у методиці експлуатаційних випробувань, – зносостійкістю та довговічністю, матеріал БрЗГ показав кращі показники ніж штатні накладки ПКД-4 та вугільні вставки типу Б. На електровозах в пасажирському русі збільшення ресурсу контактних пластин марки БрЗГ порівняно з пластиною марки ПКД більше ніж в 1,66 рази, у вивізному режимі на вантажних електровозах більше ніж в 1,90 рази. На змінному струмі у режимі електровоза-штовхача збільшення ресурсу контактних пластин марки

БрЗГ порівняно з ресурсом вугільних вставок типу "Б" більше ніж в 26,94 разів. При експлуатації вставок з матеріалу БрЗГ на тролейбусах, порівняно з штатними вугільними вставками, обрані показники перевищені понад 68 разів, залежно від умов експлуатації.

Література

1. Дьяков В. О., Босий Д. О., Антонов А. В. Контактна мережа електрифікованих залізниць. Улаштування контактної мережі: навч. пос. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт–Сервіс», 2017. 228 с.
2. Рекомендации по применению наиболее целесообразных материалов для вставок (пластин) токоприемников и их конструкции. URL: http://osjd.org/doco/public/ru?STRUCTURE_ID=5070&layer_id=4581&refererLayerId=5315&refererPageId=4&id=732
3. ТИ-514. Техническое обслуживание и ремонт токоприемников отечественных электровозов постоянного и переменного тока. Технологическая инструкция. 1988.
4. «Правила капітального ремонту КР-1, КР-2 електровозів змінного струму серій ВЛ80в/і, ВЛ82М» ЦТ-0134, затверджених наказом Укрзалізниці від 16.03.2006 р. № 253-ЦЗ.
5. ЦТ-0038. Правила технічного обслуговування та поточного ремонту електровозів змінного струму ВЛ60к ВЛ60п, ВЛ80к, ВЛ80с, ВЛ80т, ВЛ82м, затверджені наказом Укрзалізниці від 30.01.2002. № 40-Ц.
6. Барановський Д. М. Теоретичні передумови підвищення надійності системи "контактна підвіска – струмоприймач" зменшенням інтенсивності зношування її елементів після лазерного модифікування // Проблеми трибології. 2007. № 2. С. 34–38.
7. Большаков Ю. Л., Антонов А. В. Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми "контактний провід – вугільна вставка" // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2015. № 6. С. 35–44. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57006>
8. Коваль В. А. Результаты стендовых исследований ковзних контактов мського электротранспорта // Электрификация транспорта. 2013. № 5. С. 41–46. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eltr_2013_5_8
9. 539-ЦЗ. Правила ремонту КР-1, КР-2 електровозів серій ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11. ЦТ-0119. К., 2006. 172 с.
10. ГОСТ 434-78. Шины медные электротехнического назначения.
11. ЦТ-0188. Правила технічного обслуговування та поточних ремонтів електровозів постійного струму ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11. затв. Наказ Укрзалізниці 28.07.2009 р. № 418-Ц.
12. Беляев И. А. Машинисту о контактной сети и токосъеме. Москва: Транспорт, 1986. 127 с.
13. Берент В. Я. Перспективы улучшения работы сильноточного скользящего контакта «контактный провод токосъемный элемент полоза

токоприемника» // Железные дороги мира. 2002. № 10. С. 46–51.

14. Гершман И. С. Токосъемные углеродно-медные материалы // Вестник ВНИИЖТ. 2002. № 5.

15. Степанчук А. М., Богатов О. С. Експлуатаційні властивості антифрикційних матеріалів на основі дисперсно-зміцненої міді при використанні їх як струмознімачів трамваїв // Проблеми тертя та зношування. 2018. № 1 (78). С. 50–55. URL: <http://ecobio.nau.edu.ua/index.php/PTZ/article/viewFile/12758/17591>

16. Романов С. М., Романов Д. С. Антифрикційний матеріал романіт-увлш, спосіб його одержання та елемент вузла тертя: Пат. № 84599. № а200610502; заявл. 04.10.2006; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 21.

17. Aydin I., Karakose M., Akin E. A New Contactless Fault Diagnosis Approach for Pantograph-Catenary System Using Pattern Recognition and Image Processing Methods // Advances in Electrical and Computer Engineering. 2014. Vol. 14, Issue 3. P. 79–88. doi: <https://doi.org/10.4316/aece.2014.03010>

18. Zhao H., Barber G. C., Liu J. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current // Wear. 2001. Vol. 249, Issue 5-6. P. 409–414. doi: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(01\)00545-2](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(01)00545-2)

19. Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current / Chen G. X., Yang H. J., Zhang W. H., Wang X., Zhang S. D., Zhou Z. R. // Tribology International. 2013. Vol. 61. P. 88–94. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.11.020>

20. Bucca G., Collina A. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph–catenary system // Wear. 2009. Vol. 266, Issue 1-2. P. 46–59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.05.006>

21. Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds / Ding T., Chen G. X., Wang X., Zhu M. H., Zhang W. H., Zhou W. X. // Tribology International. 2011. Vol. 44, Issue 5. P. 437–444. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.11.022>

22. Friction and Wear Behaviors with Electric Current of Carbon Strip/Copper Contact Wire for Pantograph /Catenary System / Ding T., Li Y., Xu G., Yang Y., He Q. // DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. 2017. doi: <https://doi.org/10.12783/dtetr/apetc2017/11246>

23. Study on Friction and Wear Properties of Pantograph Strip/Copper Contact Wire for High-Speed Train / Ding T., Xuan W., He Q., Wu H., Xiong W. // The Open Mechanical Engineering Journal. 2014. Vol. 8, Issue 1. P. 125–128. doi: <https://doi.org/10.2174/1874155x20140501005>

24. Технические требования к токоприемникам электроподвижного состава для скоростей движения до 250 км/ч. URL: http://osjd.org/doco/public/ru?STRUCTURE_ID=5070&layer_id=4581&refererLayerId=5315&refererPageId=4&id=672

25. ГОСТ 32204-2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия.

26. ДСТУ ГОСТ 32680:2016. Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови (ГОСТ 32680-2014, IDT).

27. EN 50318:2002. Применение на железных дорогах. Системы токосъема. Технические критерии для оценки взаимодействия токоприемника и контактной подвески.

28. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: справочник / ред. И. М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985. 442 с.

29. Мінеєв О. С., Баб'як М. О., Мінеєв А. О. Композиція для виготовлення струмознімного елемента струмоприймача електрорухомого складу: Пат. № 90838. № u201400462; заявл. 20.01.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

30. Мінеєв А. О., Баб'як М. О., Мінеєв О. С. Спосіб подачі мастила в зону тертя між контактним дротом та струмознімним елементом: Пат. № 93116. № u201400457; заявл. 20.01.2014; опубл. 25.09.2014, Бюл. № 18.

31. Баб'як М. О. Ресурсозберігаюча технологія експлуатації накладок струмоприймачів з урахуванням їх взаємодії з контактним дротом // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2018. № 2. С. 32–37.

32. Баб'як М. О., Горобець В. Л., Артемчук В. В. Дослідження фізико-механічних властивостей накладок пантографів, що застосовуються в якості струмоз'ємних елементів електрорухомого складу // Электрические контакты и электроды. Серия: Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия. 2016. С. 89–100.

33. ЦЕ-0023. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць. К.: ТОВ "Інпрес", 2008. 208 с.